虚假信息群体免疫传播阈值测度模型

杨仁彪 [1] 曹高辉 [1] 李园园 [1] 董焕晴 [1]

1.华中师范大学信息管理学院 武汉 430000

摘要：[目的/意义]社交媒体时代虚假信息传播误导公众认知，干扰了正常的信息传播秩序，亟需采取有效措施予以遏制。**[方法/过程]**基于预防接种理论构建了虚假信息群体免疫传播阈值测度模型，采用建模仿真的方法探究了虚假信息群体免疫的传播阈值以及传播阈值的稳定性，并通过层层假设的研究思路分析了阈值区间数值点的模糊性问题，最后还进一步提出了估算群体免疫传播阈值的方法。**[结果/结论]**虚假信息群体免疫传播阈值可能并不是某个具体数值，而是一个具有模糊性质的区间范围。当免疫者与信谣者人数之比不低于二者感染能力之比时，能够实现虚假信息群体免疫，否则无法实现群体免疫。两种估算方法均能够预测虚假信息群体免疫阈值区间，但经验估算法较区间倍数法更加精准。

关键词：虚假信息 群体免疫 传播阈值测度 预防接种理论 建模仿真

分类号：G206

Abstract

Threshold measurement model for herd immunity transmission of misinformation

Renbiao Yang[1] Gaohui Cao[1] Yuanyuan Li[1] Huanqing Dong[1]

1. School of Information Management, Central China Normal University, Wuhan 430000

Abstract：[Purpose/Significance] In the era of social media, the spread of misinformation misleads public perception and disrupts the normal order of information dissemination. Effective measures are urgently needed to curb it. **[Method/Process]** A threshold measurement model for the spread of misinformation herd immunity was constructed based on the theory of vaccination prevention. The modeling and simulation methods were used to explore the spread threshold and stability of misinformation herd immunity. The fuzziness of threshold interval numerical points was analyzed through a layered hypothesis research approach. Finally, a method for estimating the spread threshold of herd immunity was further proposed. **[Result/Conclusion]** The threshold for herd immunity transmission of misinformation may not be a specific numerical value, but rather an interval range with fuzzy properties. When the ratio of the number of immune individuals to those who believe in rumors is not lower than the ratio of their infection ability, misinformation herd immunity can be achieved, otherwise herd immunity cannot be achieved. Both estimation methods can predict the immune threshold interval of misinformation populations, but the empirical estimation method is more accurate than the interval multiple method.

Keywords： Misinformation; Herd immunity; Propagation threshold measurement; Inoculation theory; Modeling and simulation

1 引言

数字化时代，互联网和社交媒体的广泛普及极大地促进了信息获取与分享的便捷性 ，但同时虚假信息的传播途径也变得更加多元和便捷，虚假信息日益泛滥。虚假信息蕴含着复杂多变的语言学与语义特性，其形态多样，涵盖虚假新闻、误解言论、阴谋论叙述、讽刺性内容、捏造事实及未经核实的谣言等广泛范畴 ，旨在通过捏造、篡改或夸大事实，达到特定的目的或效果[1]。此外，随着人工智能技术的不断进步，生成虚假信息的手段变得更加智能化和个性化，使得虚假信息的传播更加精准和隐蔽，这也进一步加剧了虚假信息的传播。虚假信息的传播不仅扭曲了个人的判断与认知过程，而且对社会管理和公共安全也构成了严重威胁。当前，虚假信息的治理已经成为全球范围内网络安全与社会文明建设的重要议题。国家政府部门和相关机构也已出台了一系列政策和法规，以应对虚假信息带来的负面影响。例如，我国通过发布《互联网信息服务算法推荐管理规定》《网络信息内容生态治理规定》等一系列政策，均明确了对虚假信息传播的法律约束和监管要求。此外，其他许多国家也加强了对人工智能技术应用中的伦理和安全管理，旨在遏制虚假信息的生成和扩散。

虚假信息的传播与流行病学中的传染病传播类似，具有极高的传染性和扩展性。因此长久以来，学者们都热衷于将生物医学中疾病或病毒相关的概念引申至虚假信息传播治理领域，例如 SIR 模型及其各种变体[2-4]。但这些研究大多聚焦于单一的技术方法、管控措施，或是

从个体角度出发探讨不同的治理模式和预防控制策略，却忽略了在群体层面上的集体行动和免疫机制。虚假信息的大范围传播根植于复杂的社会信息网络，个体预防往往难以抵御整体性的虚假信息冲击。唯有在社会层面形成针对虚假信息的免疫屏障，才能有效遏制虚假信息在人群中的肆意扩散，即一定程度上达成虚假信息的群体免疫。虚假信息群体免疫（Herd immunity to misinformation）是指当人群中对某种虚假信息具备免疫力的个体达到一定数量时，能在社会层面形成一道保护屏障，使易感人群接触到被感染个体的机会大幅减少，从而阻断虚假信息的传播与暴发[5]。实现虚假信息群体免疫关键在于需要明确至少多大比例的免疫个体才能构筑起有效的免疫屏障，进而阻断虚假信息的传播，也就是群体免疫的传播阈值问题。群体免疫传播阈值（Herd immunity spreading threshold, HIST）指的是能够有效遏制虚假信息大规模传播的最低的免疫个体人数占比，当高于或等于该阈值则能够实现虚假信息群体免疫，否则无法实现群体免疫。群体免疫的现实基础在于人群中随机且广泛地分布着相当数量的个体免疫者，他们的存在对其他易感人群起到了很好的保护作用[6]。因此提升个体对虚假信息的认知水平与抵抗能力对于实现虚假信息群体免疫至关重要。现有研究表明，通过预防接种的方式能够有效增强个体对虚假内容的鉴别力与免疫力，该理论也被称为预防接种理论[7]。该理论认为，通过实施预先警告与先发纸人的反驳能够使人产生认知抗体，从而抵御未来可能出现的虚假信息攻击，因此该理论一直被广泛运用于虚假信息预防与治理。有鉴于此，本研究基于预防接种理论构建虚假

信息群体免疫传播阈值测度模型，并从宏观角度探讨虚假信息群体免疫传播阈值，以期为虚假信息治理提供理论指导和实践路径，为构建更加健康、安全的网络信息环境贡献力量。

2 文献综述

预防接种理论最早由 McGuire 于 20 世纪 60 年代提出，其本质源于生物学隐喻，类似于人们会对病毒感染产生免疫，个体也可以通过心理“接种”来抵御说服性攻击[8-9]。该理论认为，通过预先将人们暴露于警告和先发制人的反驳中使其产生认知阻力进而抵御未来可能发生的虚假信息攻击[7]。Wang[10]进一步研究发现接种信息发挥效用的两种重要中介因素是感知到的反驳难易程度和愤怒，并且接种信息兼具预防作用和治疗作用。预防接种理论早期研究的重点主要关注“文化真理”等常识性议题，近些年学者们积极尝试将其应用于有争议的议题上，以应对不同领域虚假信息的广泛传播[11]。如 van der Linden 等[12]针对有关气候变化的虚假信息造成的公众对气候变化科学共识态度两极分化的问题，验证了预防接种对保护公众免受虚假信息侵害、坚持正确认知的有效性。此外，预防接种理论在政治和健康领域的虚假信息治理方面也发挥着重要作用，Banas 和 Miller[13]发现预防接种可以有效对抗“9 • 11”阴谋论，减少此类虚假信息的传播；Roozenbeek 和 Van Der Linden[14]开发了一款用于教育参与者识别和抵制假新闻的“假新闻游戏”，并评估了游戏在降低假新闻可信度和说服力方面的有效性；还有研究发现预防接种同样适用于抵御有关乳腺

癌[7]、疫苗接种[15]的虚假健康信息，降低虚假信息对公众健康的危害，保护公众健康意识。

虚假信息的预防接种主要包括基于事实的接种、基于逻辑的接种和游戏化接种三种方式，事实与逻辑接种分别强调以事实论据和逻辑技巧为核心，而游戏化接种则是借助游戏手段帮助个体在交互式过程中主动形成认知抗体[16]。基于事实的接种是应用较早且广泛的虚假信息预防手段，Arede 等[17]通过向儿童和青少年提供有关疫苗安全性和有效性的事实性证据，提高了他们的疫苗接种意愿；还有研究通过预先提供针对“9·11”事件真相运动所提出论点的具体事实性反驳，增强了参与者对该事件阴谋论的抵抗力[13]。然而，鉴于网上虚假信息数量庞大，人们难以提供针对每一条虚假信息的事实性反驳，因此其可扩展性受限[11,18]。对此，学者们积极探索更具有普适性的接种方式——基于逻辑的接种，即预先对虚假信息的推理过程、逻辑谬误与论述技巧反驳的方式[16]。Cook 等[19]测试了侧重于揭露虚假信息中使用的误导性论证技巧的接种信息的干预效果，发现预先警告参与者有关“虚假平衡”和“假专家”的操纵技巧，能增强人们对俄勒冈全球变暖请愿书的抵抗力；Roozenbeek 等[20]制作了五个短视频作为接种信息，旨在帮助人们抵御虚假信息中常用的操纵技术，包括情感操纵语言、不连贯、虚假二分法、替罪羊和人身攻击。上述这些接种方式主要是借助图文、视频等形式的接种信息，直接向人们提供针对虚假信息的警告和先发制人的反驳信息，属于被动接种。相反，主动接种通过促使个体主动参与反驳，加深了对接种信息的深入理解和长期记忆，从而

更有效地对抗虚假信息[8]。对此，学者们正在积极探索通过游戏化的方式实现主动接种，如 Roozenbeek 和 van der Linden[14,21]与荷兰媒体公司 DROG 合作开发的假新闻游戏 *Bad News*，鼓励玩家扮演假新闻制造者的角色，学习掌握六种常用的制造虚假信息的技巧：两极分化、引发情绪、传播阴谋论、网络钓鱼、转移指责和冒充假账户，多项研究测试了 *Bad News* 游戏对抗虚假信息的有效性[22-24]错误!未找到引用源。此外，学界和业界机构也合作开发了 *Go vira*[25]、*Harmony square*[26]和 *Cranky Uncle*[27]等游戏，共同抵御不同领域虚假信息的传播。

从事实接种到逻辑接种，从被动接种到主动接种，预防接种通过培养个体的信息辨别能力，降低对虚假信息的感知可信度和分享意愿，提高对真实信息的感知可信度和分享意愿，有效增强了个体对虚假信息的免疫力[28]。随着接种理论的进一步发展，如何从个体接种转向“群体免疫”成为一个重要的研究问题，即当人群中接种“认知疫苗”的人数达到一定数量时，虚假信息无法再继续传播，从而达到群体免疫的效果[18]。“群体免疫”实现的关键步骤在于减少虚假信息的传播和促进“接种疫苗”的传播[29-30]，当前已有少部分学者探讨了通过游戏化接种的方式来促进“认知疫苗”的传播[31]，然而此类研究主要聚焦于微观层面的个体接种并以问卷量表的方式测量干预效果[32-33]，无法从宏观层面解释虚假信息的群体免疫机制。从本质上剖析，虚假信息的传播构成了一种广泛存在的社会宏观现象。唯有当足够数量的个体发展出对虚假信息的有效“抵御机制”，换言之，即在社会层面达成一种类似“群体免疫”的状态，才能有效地遏制虚假信息的流传与扩散。

此外，还有学者采用仿真模拟的方法探究实现群体免疫的可能性[34]，然而，此类研究主要探究了不同接种方式对公民信念形成和虚假信息传播的影响，缺少对群体免疫传播阈值的进一步探索。明晰群体免疫传播阈值是实现针对虚假信息群体免疫防护机制的前提与关键一步。唯有在精确阐明群体免疫概念中“一定数量”这一关键阈值的具体含义后，才能有效指导实践层面上的虚假信息传播预防与阻断工作。缘此，本研究将基于“接种理论”从宏观角度探讨虚假信息群体免疫传播阈值，采用仿真模拟的方法模拟群体中虚假信息的免疫过程，并测度在什么情况下达到群体免疫，进而为制定高效的虚假信息防御策略提供科学依据。

3 模型构建

3.1 节点类型及演化规则

（1）认知抗体　在生物医学中，抗体（Antibody）主要指的是机体由于抗原的刺激而产生的具有保护作用的蛋白质[35]。在社会学领域，有学者将认知抗体（Cognitive antibody）理解为个体在心理层面上对虚假信息、有害思想等的抵抗力，可以看作个体心理上的“抗体”，帮助个体识别并中和外来的威胁[16]。本研究依旧沿用这一定义并且通过赋值的方式将其量化，即本研究认为可以通过数值大小来反映个体认知抗体水平高低，数值越大，则个体认知抗体水平越高，意味着对虚假信息的抵抗能力越强。当认知抗体水平为正（正抗体）时，表示对虚假信息具有正向的抵抗力，反之，当认知抗体水平为负（负抗体）

时，则表示对虚假信息不具备任何抵抗力，反而将会相信虚假信息，类似于流行病学中“受到感染”的个体。

（2）节点类型划分 依据前文对认知抗体的定义，本研究假定个体自身认知抗体水平(cog_anti)决定了个体面对虚假信息时的态度（信任、中立或者免疫），因此，本研究作如下判定标准：

$cog_anti < 0$，信谣者；

$0 \leq cog_anti < 4$，中立者；

$cog_anti \geq 4$，免疫者；

其中，信谣者（Deceived，此处的“谣”并非专指谣言，泛指一切虚假信息）类似于传染病模型中的感染者（但含义有所不同，传染病模型中的感染者主要描述的是个体在接触到虚假信息以后，主动将虚假信息传递给其他节点，强调了“传递”这一行为动作，而本研究中的信谣者主要刻画的是个体面对虚假信息时的态度，而非“传递”行为。个体相信虚假信息，但其可以选择传递或者不传递虚假信息。中立者（Neutral）对虚假信息持一种无知或者中立的态度，这类个体或是因为从未听说过此类虚假信息而处于一种懵懂、不知所谓的无知状态，或是听过此类虚假信息但自身对此缺乏足够的鉴别能力而处于一种将信将疑的中立态度。此类个体通常在人群中占绝大多数，并且容易受到其他个体的影响而转变自身的态度。免疫者（Immune）指的是对虚假信息具有相当程度的抵抗能力并且对虚假信息持质疑、拒绝以及不信任态度的个体。

（3）状态转换规则　由于个体抗体水平处于连续变化的状态，因此个体面对虚假信息时的态度也是连续的动态演化过程（如图 1 所示）。当个体抗体水平发生变化，那么个体所处的认知状态也会相应发生变化，即完成不同节点之间的相互转化。节点状态的转换主要通过节点之间互相接触、互相影响得以实现。相关研究表明，虚假信息在人群中的扩散速度高于真实信息[36]，因此本研究假定虚假信息的“影响能力”大于认知抗体的影响能力，换言之，信谣者对其他节点的影响强于免疫者。因此当不同类型的节点接触时，作如下具体规定：

信谣者--无知者：（0，-0.06）

信谣者--免疫者：（+0.03，-0.06）

信谣者--信谣者：（-0.06，-0.06）

免疫者--免疫者：（+0.03，+0.03）

免疫者--无知者：（0，+0.03）

无知者--无知者：（0,0）

其中，数值大小表示认知抗体变化幅度，正负号表示认知抗体增加或者减少（变化方向）。以“信谣者与免疫者相互接触（信谣者--免疫者：（+0.03，-0.06））”为例进行说明。由于信谣者受到免疫者观点或者态度的影响，自身的认知抗体将增加 0.03 个单位（图中表示向右移动 0.03 个单位），表明其对虚假信息的信任程度将减弱。同样地，由于信谣者的观点态度也会对免疫者产生一定影响，因此免疫者自身的认知抗体也将减少 0.06 个单位（图中表示向左移动 0.06 个单位），这表明其对虚假信息的抵抗程度将会减弱。总体而言，凡是与信谣者

接触都将使被接触者的认知抗体固定减少 0.06 个单位（无论被接触者是中立者、无知者还是信谣者），凡是与免疫者接触都将使被接触者的认知抗体固定增加 0.03 个单位（无论被接触者是中立者、信谣者还是免疫者），而中立者的观点态度不具有明显的倾向性或者对虚假信息的认知十分有限，因此对其他节点的影响较小（本研究中忽略不计）。

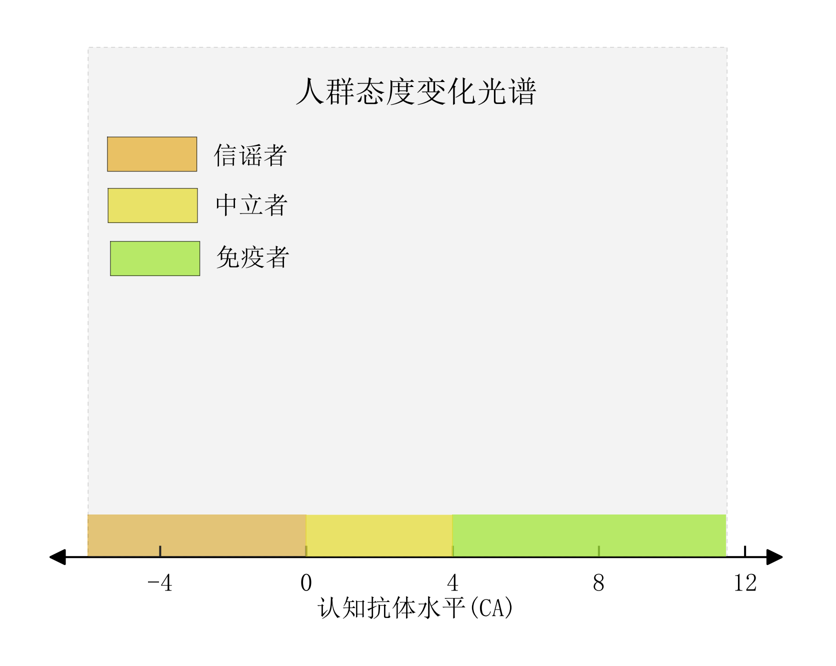


图 1 认知状态转移

（4）群体免疫的实现标准 在传统的流行病学中，群体免疫的实现标准通常与疾病的基本再生数R_0有关[37]。吴丹等根据新冠病毒的基本再生数与群体免疫的关系式计算得出群体免疫的临界阈值为 38%-85%[38]。因此，本研究参考该文献并取临界阈值 85%作为虚假信息群体免疫的实现标准，即当最终稳定状态下免疫者人数占比超过 85%

时，则本研究认为虚假信息传播得到了“比较好”的控制，即可以被认为已经在社会层面实现了虚假信息群体免疫。

3.2 模型参数及算法思想

3.2.1 模型参数

本研究主要参数如表 1 所示

表 1 模型参数

参数	参数说明
$seed_num$	节点数量
$init_dece$	信谣者初始值
$init_immu$	免疫者初始值
$init_neut$	中立者初始值
cog_anti	认知抗体

节点数量($seed_num$)：表示模型中所有节点数量，即人群规模。

初始人数占比($init_dece, init_immu, init_neut$)：分别表示在初始时刻信谣者、免疫者以及无知者的人数占比。

认知抗体(cog_anti)：表示个体的认知抗体水平。

3.2.2 主要算法思想

（1）预先接种实验　首先通过随机的方式生成一定数量($seed_num$)的节点($seed$)，并且这些节点的认知抗体初始值(cog_anti)在(0,4)之间，这意味着此时所有个体均为中立者。然后从

中随机抽取一定数量($init_immu$)节点展开预先接种实验并将其转化为免疫者，使其认知抗体水平提升至(4,8)区间范围。同样地，再随机抽取一定数量($init_dece$)的节点将其转换为信谣者，并使其认知抗体水平处于$(-4,-1)$之间。其余个体仍为中立者，并且有$init_neut = 1 - init_dece - init_immu$。

（2）节点接触方式 在每一轮模拟运算过程中，所有节点都会以随机接触的方式与其他 0~5 名个体“相遇”（可能是同类节点也可能是异类节点，但不能是该节点本身）。在“相遇”的过程中，节点之间相互影响，从而改变自身当前的认知抗体水平(cog_anti)。当认知抗体水平低于 0 个单位时，将处于信谣者状态，当认知抗体水平处于[0,4)区间时，将处于中立者状态，当认知抗体水平处于$[4,+\infty)$，将处于免疫者状态。

4 仿真实验

本研究采用 python 语言进行仿真模拟。在仿真实验开始之前，首先需要对模型中相关参数设置进行简单说明。本研究中的节点数量为 10000($seed_num = 10000$)，并且假定最开始信谣者在人群中的占比为 5% ($init_dece = 0.05$)，免疫者的人数占比为 n%($init_immu = n$),则中立者的人数占比为$init_neut = 1 - 0.05 - n$。

4.1 群体免疫传播阈值探究

本小节主要是为了探究虚假信息群体免疫的传播阈值，即当人群中免疫者人数占比达到多少时能够有效地遏制虚假信息的大规模传

播。为了实现这一研究目标，本研究采用试验法的方式寻找传播阈值，即通过不断调整免疫者初始值($init_immu$)的大小（n%）来观察虚假信息的传播情况，进而确定能够有效遏制虚假信息传播的最低初始值（HIST）。仿真实验结果如图 2 所示。

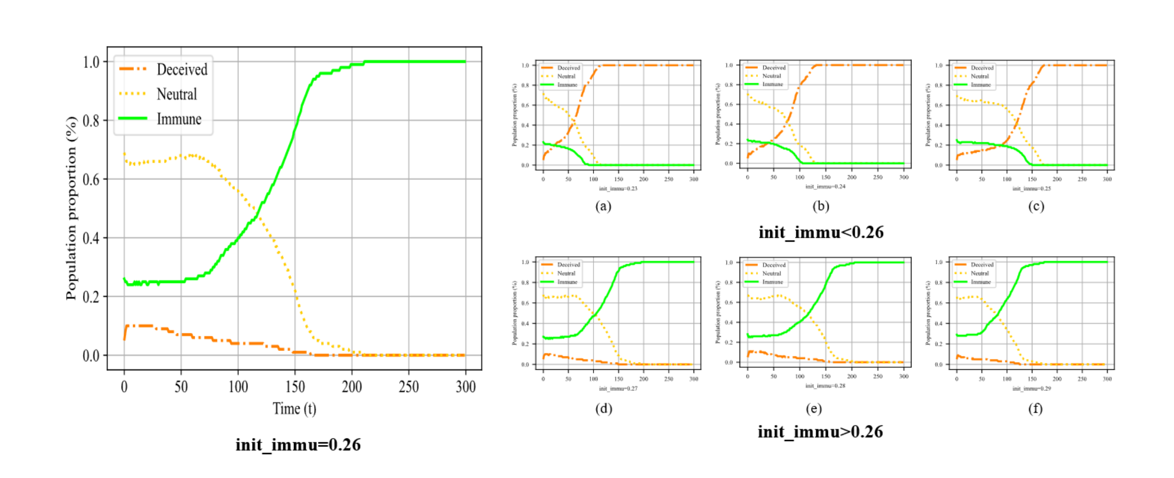


图 2　群体免疫传播阈值

从图中可以看出，当$init_immu = 0.26$时，在后续演化过程中，免疫者人数逐渐增多并且最终稳定状态下人数占比为 1，信谣者人数先是上升然后缓慢下降，最终演化为 0，而中立者人数在前 50 时步并未显著减少，但是在此之后，却迅速降低，最终稳定状态下的人数占比趋近于 0。上述仿真实验表明，此时免疫者群体在人群中占据主导地位，而信谣者基本消失，因此能够达成虚假信息群体免疫。

从图（a）~(c)中可以看到，当$init_immu < 0.26$时，后续演化过程中，免疫者人数占比全部趋近于零，信谣者人数最终演化为 1，表明此时相信虚假信息的个体在人群中占主导地位，这反映了虚假信息几乎不受控制的扩散态势，而这可能导致公众对重要事

件的理解产生严重偏差，进而引发社会恐慌与不信任感的加剧。与之相反，当$init_immu > 0.26$时，即如图（d）~（f）所示，此时免疫者人数将不断增多，并最终演化为 1，信谣者的人数占比全部趋近于零，这意味着此时免疫者“占据上风”，系统内所有节点均获得了对虚假信息的抵抗能力，进而有效遏制了虚假信息的传播扩散。

以上仿真结果表明，$init_immu = 0.26$是系统能否实现虚假信息群体免疫的关键（最低）初值点，当免疫者初始值高于该数值时，则系统内免疫者的数量将逐渐增多，直至完全占据上风，表明此时能够实现虚假信息群体免疫。然而，当免疫者初始值低于该数值时，则信谣者人数将不断增多，免疫者将逐渐减少，最终完全消失，这意味着此时无法实现群体免疫。因此，根据前文对虚假信息群体免疫传播阈值的定义， $init_immu = 0.26$即为本研究寻找的传播阈值。

然而上述传播阈值仅为一次仿真模拟结果，该结果是否具有足够的稳定性？即重复该仿真实验，是否每次都能够得到相同的演化结果（实现群体免疫）？因此，本研究还需要对上述传播阈值进行稳健性检验，以保证研究的可靠性与科学性。

4.2 群体免疫传播阈值稳定性检验

本小节将对前文得到的传播阈值展开稳定性检验，以验证该阈值是否能够保证每次实验都能实现群体免疫。模型参数设置保持不变，

然后在$init_immu = 0.26$的情况下进行 20 次仿真模拟实验，实验结果如图 3 所示。

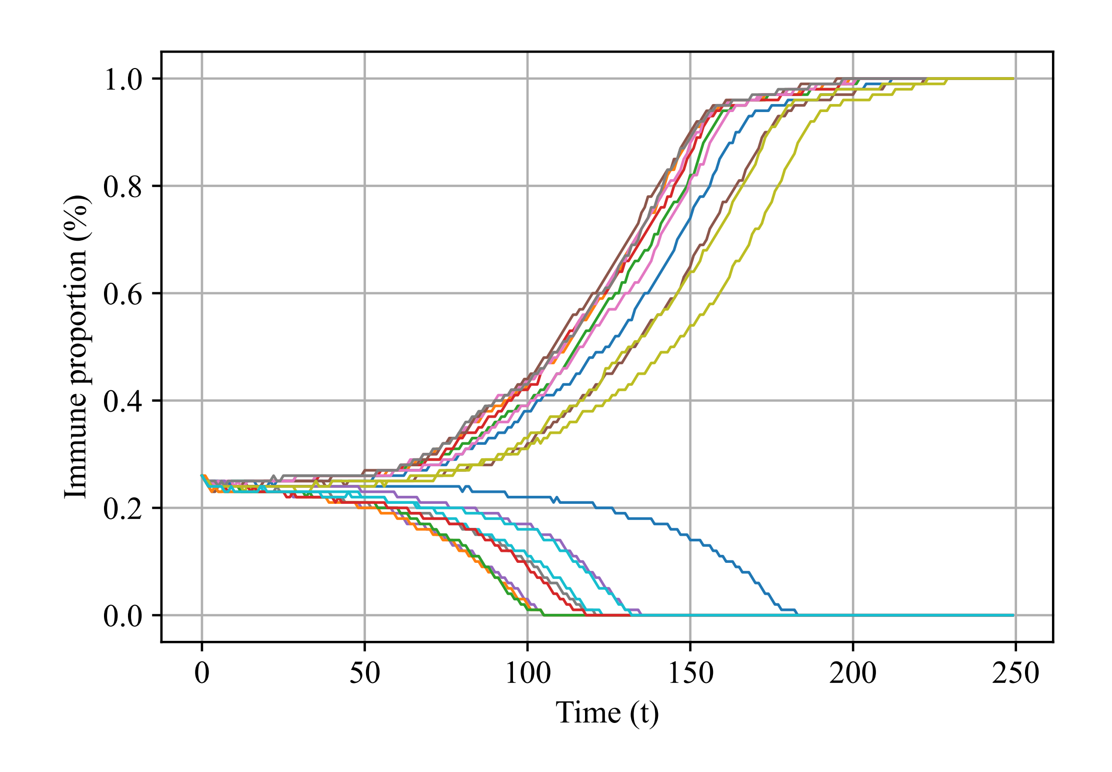


图 3 传播阈值稳定性($init_immu = 0.26$)

从图中可以看出，在 20 次仿真模拟实验中，11 次模拟结果为免疫者最终演化为 1，表明此时能够实现群体免疫，而另外 9 次实验为免疫者最终演化为 0，表明此时无法实现群体免疫。以上仿真结果表明$init_immu = 0.26$作为传播阈值并不具有良好的稳定性。当$init_immu = 0.26$时，模型既有可能实现虚假信息群体也有可能无法实现，因此，$init_immu = 0.26$是一个具有模糊性的阈值点。

然而，这样的研究结果并不是本研究所期望的，本研究期望得到具有确定性并且足够稳定的传播阈值。显然上述结果无法满足要求。因此，本研究考虑对(0.21,0.31)区间内所有免疫者初值点（保留两位

小数，例如 0.23,0.24,0.25…….）的稳定性进行检验，进而寻找具有稳定性的传播阈值。

4.3 群体免疫传播阈值稳定性曲线

为了寻找稳定的传播阈值，本小节将对(0.21,0.31)区间内的所有初值点（由前文分析可知，传播阈值大概率位于此区间内）的稳定性逐一进行检验。

本小节对于传播阈值稳定性的检验采用另一种方式---均值法。具体思路如下：首先，对于每个初值点依旧进行 20 次仿真模拟实验，然后每次运行以免疫者人数变化达到稳定状态时的稳态值作为判定能否实现群体免疫的指标（如果数值为 1，则意味着实现群体免疫；数值为 0，则意味着无法实现群体免疫）并将这一数值记为s_Val_{ij}（表示数值为i的免疫者初始值第j次模拟运行时的稳态值，$i = 0.22,0.23,0.24,\dots,0.30, j = 1,2,3\dots,20$）；最后取 20 次实验结果的平均值作为该初值点是否具有稳定的判定依据，并且，

$$avg_Val_i = \frac{\sum_{i=0.22,j=1}^{i=0.30,j=20} s_Val_{ij}}{20}$$

显然，当$avg_Val_i = 1$时，意味着该初值点能够实现群体免疫，并且具有良好的稳定性；当$avg_Val_i = 0$时，意味着该初值点无法实现群体免疫，并且具有良好的稳定性；当$avg_Val_i \subseteq (0,1)$）时，意味着该初值点有时能够实现群体免疫有时无法实现群体免疫，这表明该初值点不具有良好的稳定性，属于模糊阈值点。此外，avg_Val_i的

数值越接近于 1，则意味着该初值点实现群体免疫的概率就越大，反之，avg_Val_i越接近于 0，则该初值点实现群体免疫的概率就越小。

基于上述检验方法，本研究对(0.21,0.31)区间内的所有初值点展开仿真模拟分析，并绘制了传播阈值稳定性曲线，如图 4 所示。

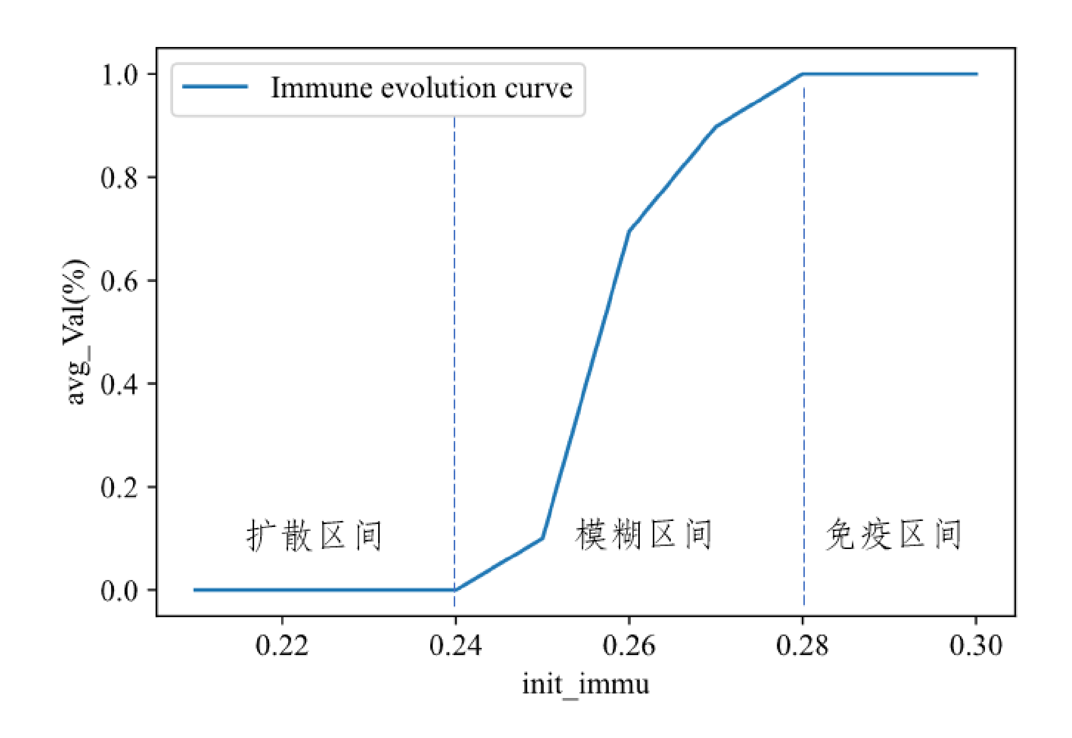


图 4 传播阈值稳定性曲线

从图中可以看出，传播阈值稳定性曲线具有明显的阶段性，并且大致可以将其划分为三个阶段：[0,0.24), (0.24,0.28)以及(0.28,1]。其中，第一阶段[0,0.24)为虚假信息扩散区间，若免疫者初始值低于 0.24，那么虚假信息将在人群中肆意蔓延，并最终导致所有个体均遭受其“侵染”；第二阶段(0.24,0.28)为传播阈值模糊区间，该区间内的免疫者初始值均有一定概率实现群体免疫，并且初值点越靠近区间上限，则实现群体免疫的概率越大，越靠近区间下限，则实现群体免疫的概

率越小；第三阶段(0.28,1]为虚假信息群体免疫区间，该区间内的所有初始值均能够稳定地实现群体免疫。

上述分析意味着本研究寻找的虚假信息群体免疫传播阈值可能并不是某个确定的数值点，而很有可能只是某个具有过渡性质的区间范围，即凡是属于此阈值区间内的初值点均有可能实现群体免疫，并且越接近阈值区间的上限，则实现群体免疫的概率就越大。

上述分析表明，阈值区间内的所有数值点均具有模糊性，即有可能实现群体免疫也有可能无法实现群体免疫，因此，什么情况下该数值能够实现群体免疫？什么情况下则不能？又或者阈值区间内的初值点实现群体免疫是否完全随机？基于上述疑问，本研究将进一步探究阈值区间模糊性的形成原因。

4.4 群体免疫阈值区间模糊性成因分析

由前文分析可知，阈值区间内的所有初值点都具有一定模糊性，这使得虚假信息群体免疫的实现充满未知和不确定，因而极大地增加了虚假信息的控制难度。因此，本小节将进一步对阈值区间内数值点的模糊性展开讨论，以期解释其形成原因。

在正式展开讨论之前，首先对免疫者变化情况进行分析。从图 3（见 4.2 小节）可以看出，在 t=50 时步之前，曲线变化较为平稳，波动幅度较小，但 t=50 时步之后却在某一时刻开始显著上升或者迅速下降并最终演化为 1 或 0。显然，区间（0,50）是决定免疫者最终演化方向的关键时期，本研究将其视为模型演化的“方向选择期”。此外，结合前文 4.3 小节仿真结果可知，当初值点位于群体免疫区间时，

那么该初值点都能够稳定地实现群体免疫，因此本研究提出第一个假设：

H1："方向选择期"内，免疫者人数占比在随机波动的过程中，若突破阈值区间上限（进入群体免疫区间），那么免疫者人数将上升并实现群体免疫；反之，若突破阈值区间下限（进入虚假信息扩散区间），则免疫者人数将下降，从而无法实现群体免疫。

为了验证上面这一假设，本研究对模型演化过程实施人为干预。主要思路如下：在"方向选择期"内，通过改变免疫者人数占比并使其产生"突变"，从而突破阈值区间上限。基于上述假设，只要免疫者人数占比突破阈值区间上限，那么免疫者人数将逐渐增加。本研究在 t=20 时步对其进行干预并将突变值设置为 0.31（$m_Val = 0.31$，高于阈值区间上限 0.28），运行模拟 20 次，仿真结果如图 5 所示。

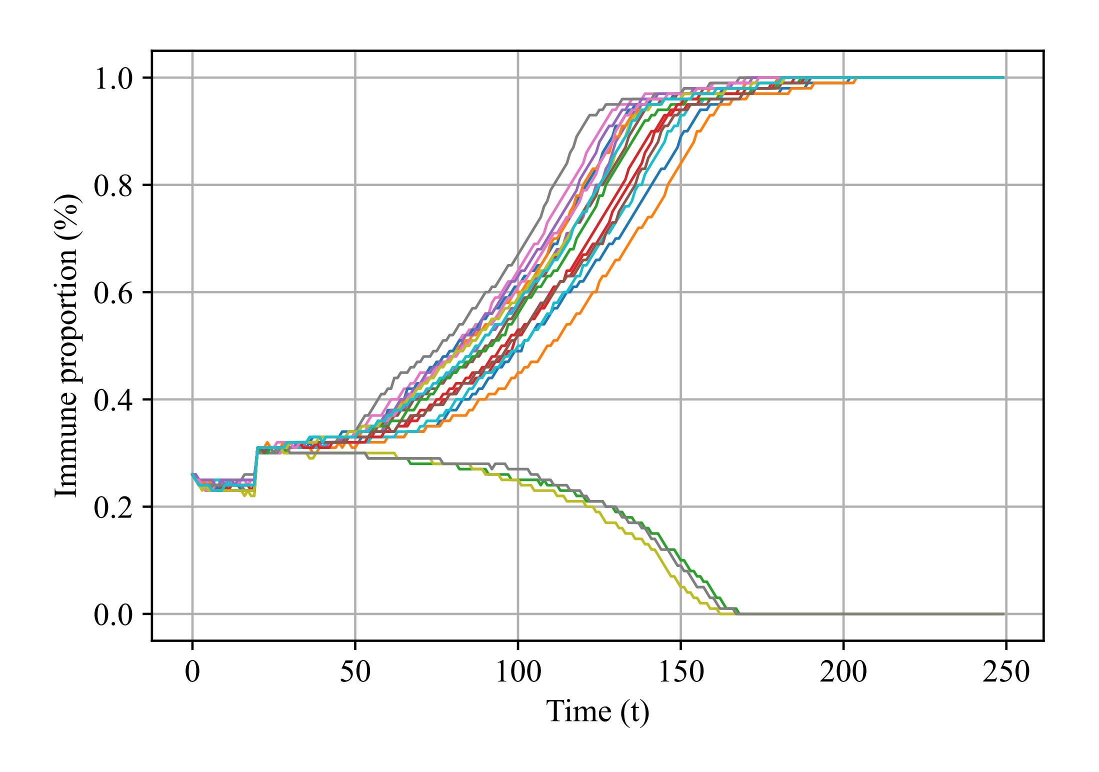


图 5 阈值区间上限突破实验

从图中可以看到，在 20 次仿真模拟实验中，17 次仿真结果为免疫者最终演化为 1，表明能够实现群体免疫，另外 3 次则是免疫者最终演化为 0，表明无法实现群体免疫。上述结果表明在“方向选择期”内，将免疫者人数占比“拔高”至 0.31，大多数情况下确实能够实现虚假信息群体免疫，但是仍然存在少数例外情形。同样地，将突变值设置为 0.20（$m_Val = 0.20$，低于阈值区间下限），运行模拟 20 次，仿真结果如图 6 所示。20 次仿真实果中，15 次最终演化为 0,另外 5 次演化为 1，依然大部分情况下有效而少数情形例外。

上述实验结果表明，假设 H1 并不能完全解释阈值区间内数值点的模糊性问题，即突破阈值区间上限或者下限并不构成免疫者人数最终演化 1 或者演化为 0 的充分条件。

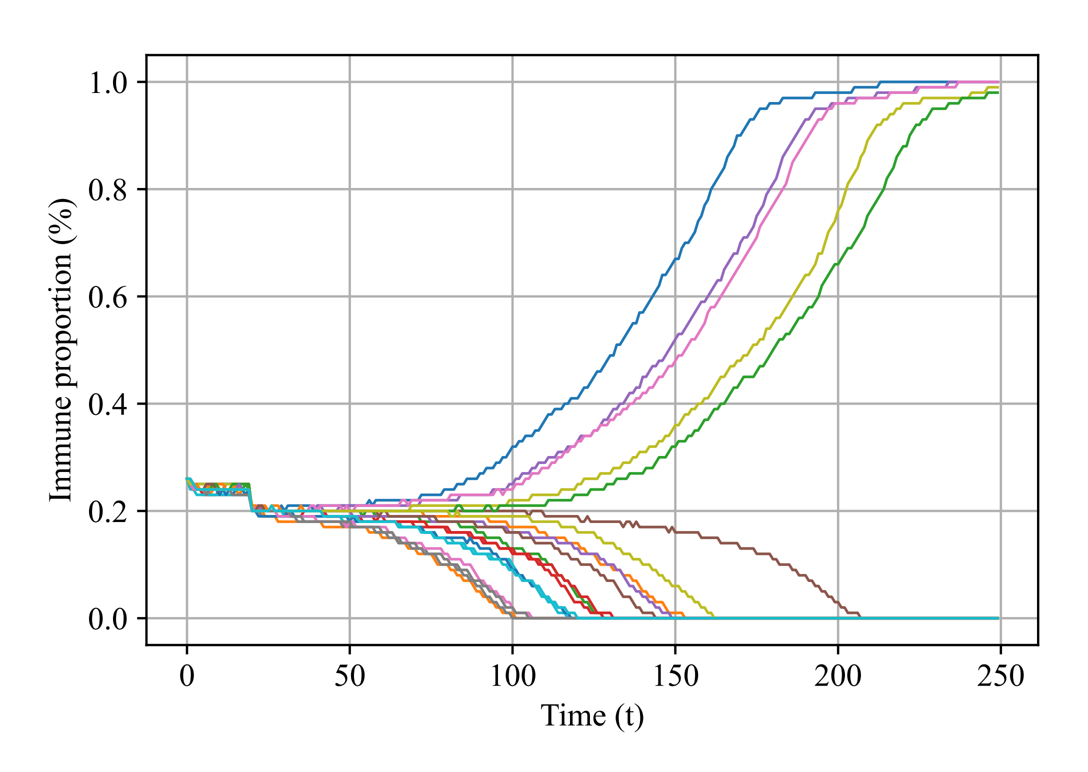
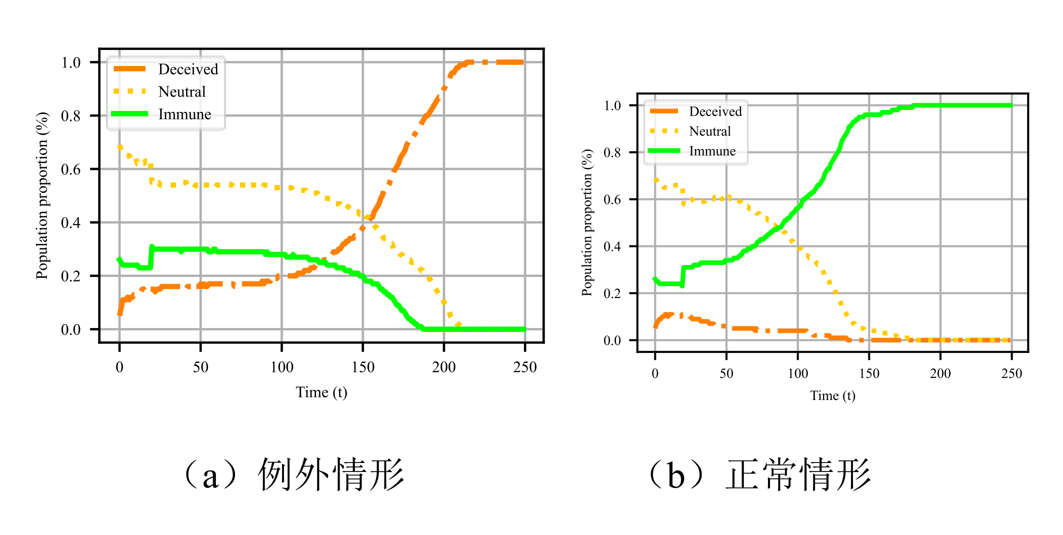


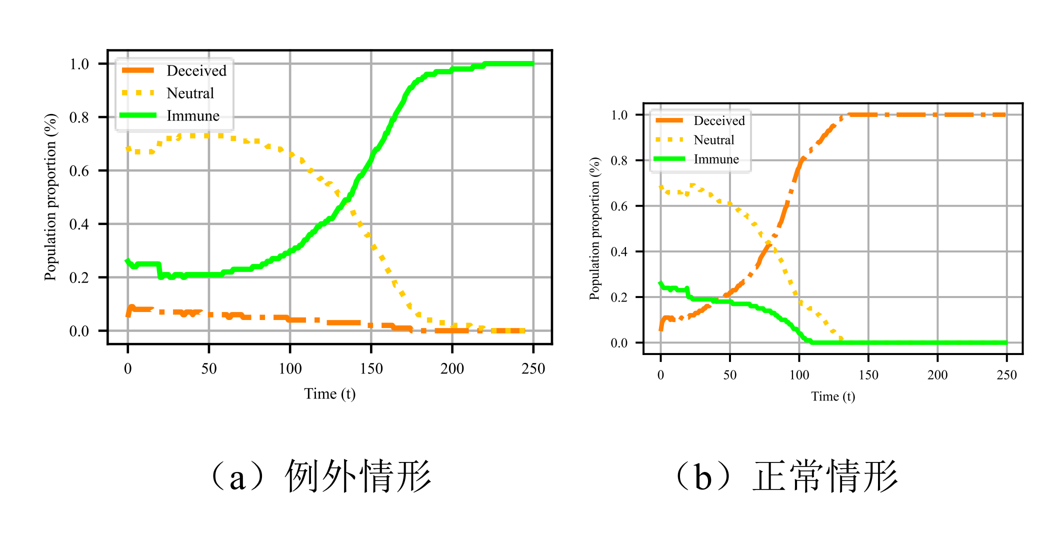
图 6 阈值区间下限突破实验

通过进一步观察发现， 图 5 所对应的例外情形中（如图 7（a）所示），虽然免疫者人数已经被“拔高”至 0.31，但是此时信谣者占比同样在迅速增加，然而在多数“正常”(符合预期)情形中（如图 7（b）所示），此时信谣者人数却呈现出下降趋势。这似乎表明阈值区间模糊性的形成不但与免疫者人数变化有关，而且与传播者人数密切相关。这一点在实施“压低”干预的过程中同样得到验证（如图 8 所示）。



（a）例外情形　　（b）正常情形

图 7 上限突破实验对应详图



（a）例外情形　　（b）正常情形

图 8 下限突破实验对应详图

基于上述观察与分析，本研究认为免疫者最终演化方向与二者人数之比有关，因此提出第二假设：

H2:“方向选择期”内，若免疫者与信谣者人数之比($ratio_{i/d}^{p}$)维持在一定范围时，则免疫者人数将逐渐增多并实现群体免疫；反之，若两者人数之比($ratio_{i/d}^{p}$)超过某一范围，则免疫者人数将减少，从而无法实现群体免疫。

在保持模型参数不变的基础上，运行模拟 20 次，仿真实验结果如图 9 所示。

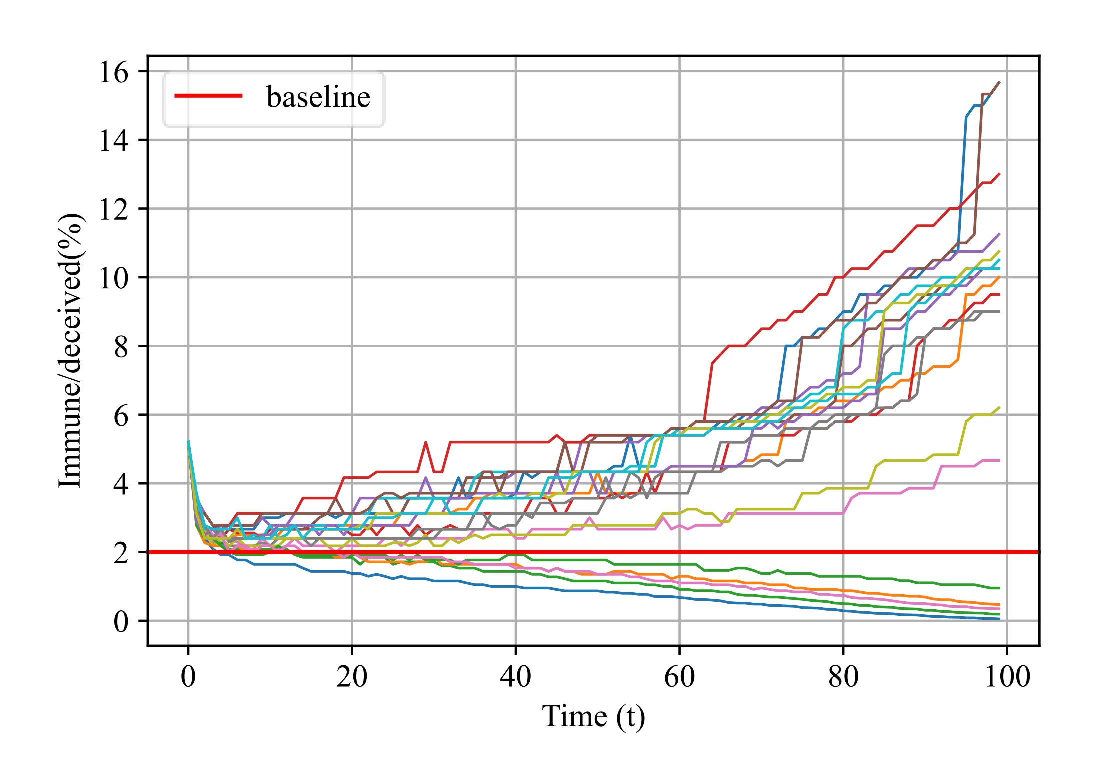


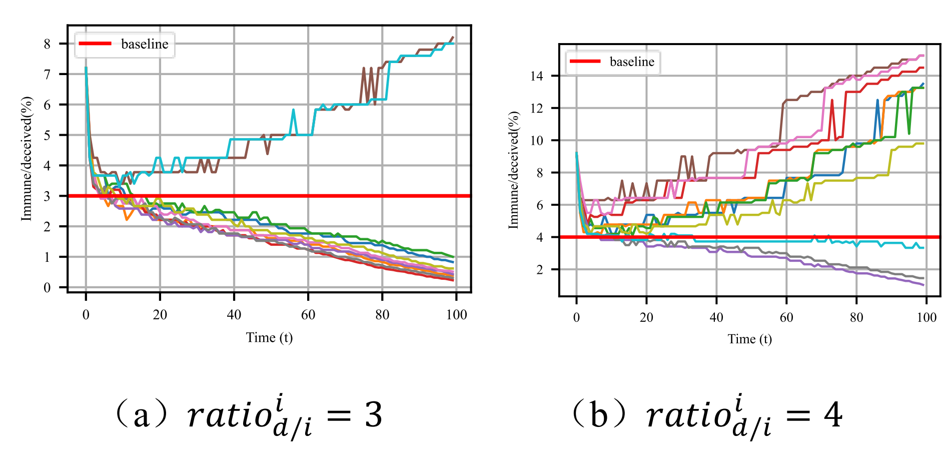
图 9　免疫者—信谣者人数之比变化图

从图中可以看到，20 次模拟实验中，10 次结果为两者人数之比上升，这意味着最终实现群体免疫，另外 10 次两者人数之比逐渐减少，意味着此时无法实现群体免疫。此外，进一步观察所有上升曲线的变化情况，可以明显地看出，所有曲线的最低点都不低于数值 2。反之，所有下降曲线无一例外都在某一时刻低于数值 2 并在之后的演化过程中逐渐减少。而数值 2 实则刚好是信谣者

与免疫者“感染能力”之比（0.06/0.03=2）。这说明阈值区间内数值点的模糊性不仅与免疫者信谣者人数变化有关，还与两者的“感染能力”密切相关。

此外，从图中还可以看到，所有曲线最开始都迅速下降，之后部分曲线开始企稳并逐渐上升。这可能是因为刚开始信谣者的“感染能力”较强，因此虚假信息能够在较短的时间内迅速传播扩散，但是随着时间的推移，免疫者的人数优势慢慢显现并逐渐占据“优势地位”，进而开始扭转局面并最终实现群体免疫。

为了进一步检验结果的可靠性，本研究将信谣者与免疫者感染能力之比 ($ratio_{d/i}^{i}$) 调整为数值 3 ($ratio_{d/i}^{i} = 0.06/0.02 = 3, init_immu = 0.36$) 和数值 4 ($ratio_{d/i}^{i} = 0.08/0.02 = 4, init_immu = 0.46$)，再次进行验证，分别运行模拟 10 次，仿真结果如图 10 所示。图 10（a）图 10（b）的模拟结果均再次验证了假设 H2 的可靠性。



（a）$ratio_{d/i}^{i} = 3$　　（b）$ratio_{d/i}^{i} = 4$

图 10　“人数之比”假设的进一步验证

基于以上分析，可以得到如下研究结论：“方向选择期”内，若免疫者与信谣者人数之比($ratio_{i/d}^{p}$)始终不低于双方“感染能力”之比的

倒数($ratio^{i}_{d/i}$)，则免疫者人数将逐渐增多并实现群体免疫；反之，若存在某一时刻二者人数之比低于“感染能力”之比的倒数，则免疫者人数将减少，从而无法实现群体免疫。该过程可以归纳为：

$$\begin{cases} \forall t \subseteq T_{(方向选择期)}, ratio^{p}_{i/d} \geq ratio^{i}_{d/i}, 则能够实现群体免疫; \\ \exists t \subseteq T_{(方向选择期)}, ratio^{p}_{\frac{i}{d}} < ratio^{i}_{d/i}, 则无法实现群体免疫; \end{cases}$$

此外，上述研究结论或许有助于解释为何假设 H1 中大部分情形都有效（能够实现群体免疫）而少部分情形无效（无法实现群体免疫）。这可能是因为在“方向选择期”内，将免疫者人数“拔高”或者“压低”对二者人数之比将产生较为显著的影响，这导致很容易超过或低于双方感染能力之比，从而使得模型提前进入到“确定”演化阶段（“方向选择期”之后，各群体演化趋势已经完全确立的演化阶段）,传播趋势将基本形成。

上述仿真实验在一定程度上解释了为何阈值区间内的数值点有时能够实现群体免疫有时则不能实现。然而，上述假设仅仅只针对的是“方向选择期”内的演化过程，而由此得出的研究结论是否同样适用于后续演化阶段（“确定”演化阶段）？因此，本研究进一步提出第三个假设：

H3：在“确定”演化阶段，通过改变免疫者与信谣者人数之比($ratio^{p}_{i/d}$)使其大于或者小于数值 2（本研究中两者感染能力之比的倒数），能够扭转已经形成的演化趋势（例如将下降趋势扭转为上升趋势，反之亦然）。

依旧参数保持不变，并且在 t=100 时步（此时模型已经进入“确定”演化阶段）实施干预，运行模拟 20 次，仿真实验结果如图 11 所示。

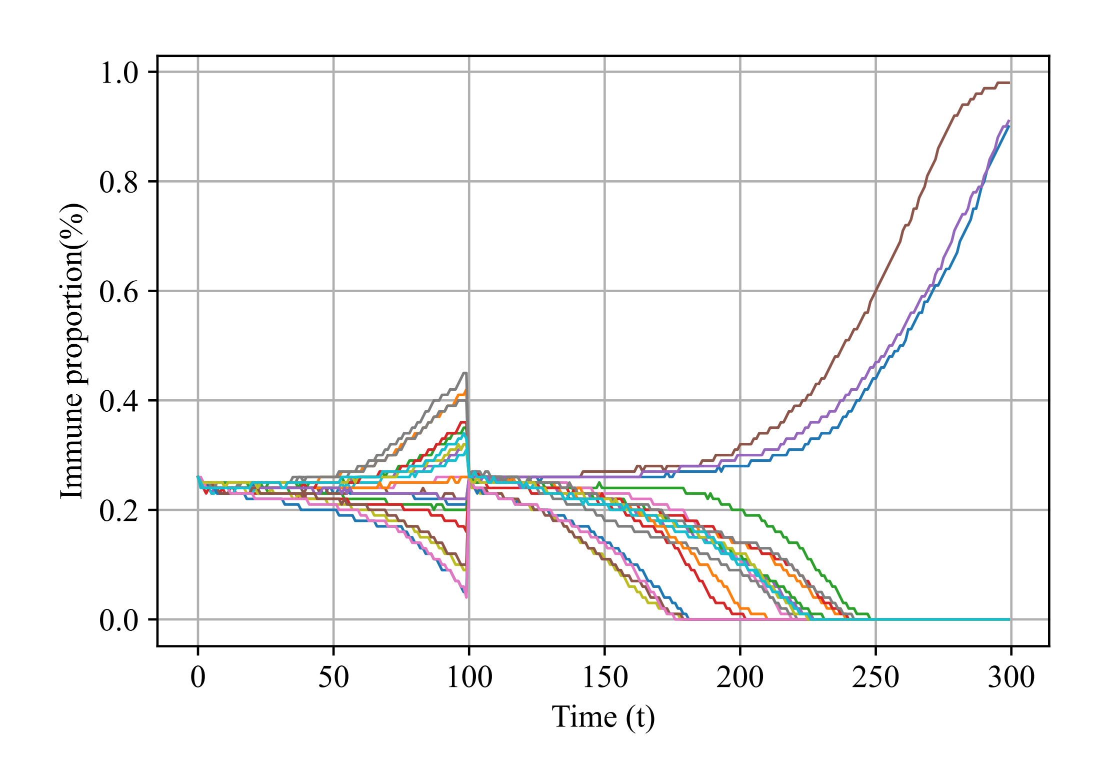
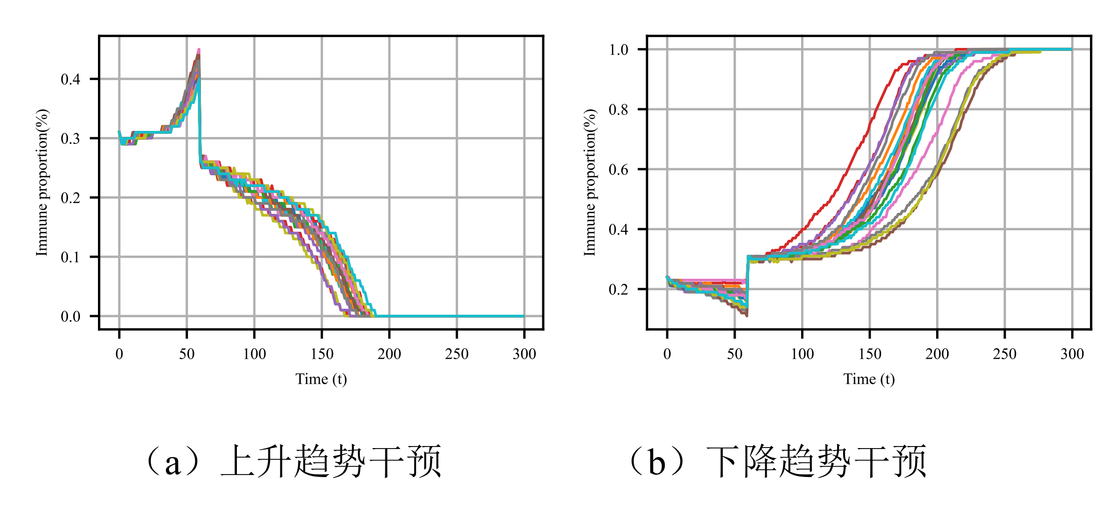


图 11 演化趋势干预实验

从图中可以看到，在 20 次仿真模拟实验当中，大部分情况下干预“成功”，即成功扭转了已然形成的演化趋势，而少部分情况下却失效，这表明改变两者人数之比($ratio_{i/d}^{p}$)使其大于或小于数值 2($ratio_{d/i}^{i} = 2$)并不能完全扭转现有的演化趋势，假设 H3 并未完全得到实验结果支持。

于是，本研究决定进一步放大二者的人数差距使其大于数值 3 或小于数值 1。出于直观展示效果的角度，本研究分别对上升演化趋势($init_immu = 0.31, m_Val = 0.26$)和下降演化趋势($init_immu =$

0.23, $m_Val = 0.26$)进行仿真模拟，运行模拟 20 次，仿真实验结果如图 12 所示。



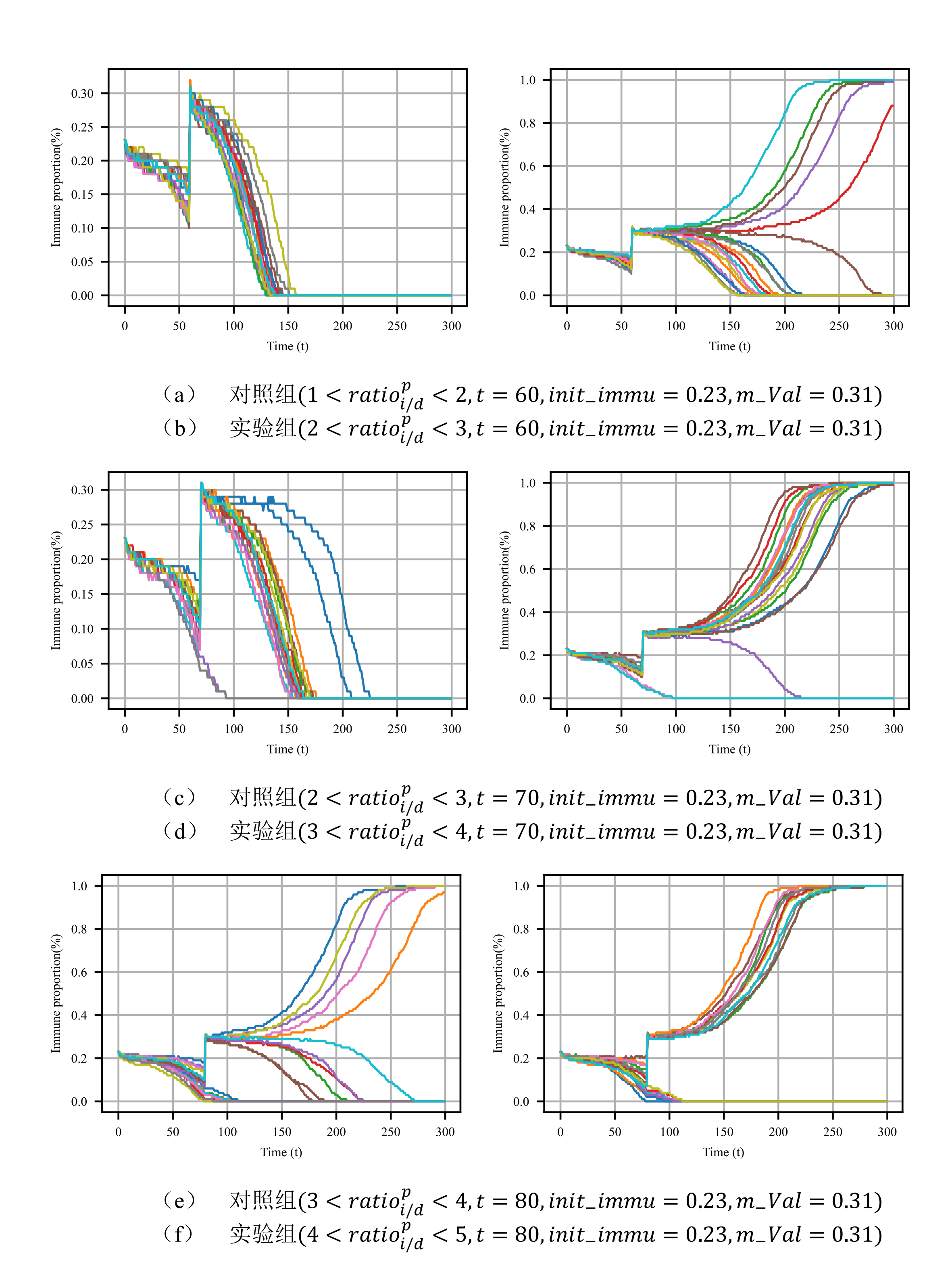
（a）上升趋势干预　　　　（b）下降趋势干预

图 12 演化趋势干预的升级实验

从图中可以看出，无论是上升演化趋势还是下降演化趋势均已被成功“扭转”，这表明扩大两者人数差距确实能够改变现有的演化趋势，同时这进一步说明“确定”演化阶段需要比“方向选择期”更显著的人数差距才能够实现虚假信息的群体免疫。于是本研究提出第四个假设：

H4:“确定”演化阶段，越到后期，则扭转现有趋势需要的人数差距就越大。

为了验证上述假设，在保持原有参数不变的基础上，本研究分别在 t=60、t=70、t=80 三个时点展开仿真模拟实验，每次实验运行 20 次，仿真结果如图 13 所示。



（a） 对照组($1 < ratio_{i/d}^{p} < 2, t = 60, init_immu = 0.23, m_Val = 0.31$)

（b） 实验组($2 < ratio_{i/d}^{p} < 3, t = 60, init_immu = 0.23, m_Val = 0.31$)

（c） 对照组($2 < ratio_{i/d}^{p} < 3, t = 70, init_immu = 0.23, m_Val = 0.31$)

（d） 实验组($3 < ratio_{i/d}^{p} < 4, t = 70, init_immu = 0.23, m_Val = 0.31$)

（e） 对照组($3 < ratio_{i/d}^{p} < 4, t = 80, init_immu = 0.23, m_Val = 0.31$)

（f） 实验组($4 < ratio_{i/d}^{p} < 5, t = 80, init_immu = 0.23, m_Val = 0.31$)

图 13 不同时点演化趋势干预实验

从第一组实验（图（a）~（b），t=60 时步）中可以看到，当$1 < ratio_{i/d}^{p} < 2$时，对于现有趋势几乎没有任何改变，当$2 < ratio_{i/d}^{p} < 3$时，已经能够对现有趋势产生影响并且使其中部分曲线的演化趋势

发生扭转；从第二组实验（图（c）~（d），t=70 时步）中可以看到，当$2 < ratio_{i/d}^{p} < 3$时，此时无法改变现有演化趋势，然而当$3 < ratio_{i/d}^{p} < 4$时，其中大部分曲线的演化趋势都得到了扭转；从第三组实验（图（e）~（f），t=80 时步）中可以看到，当$3 < ratio_{i/d}^{p} < 4$时，其中少部分曲线的趋势发生了改变，当$4 < ratio_{i/d}^{p} < 5$时，则大部分曲线的演化趋势都发生了扭转。以上三组仿真实验说明，在同一时刻，提高二者人数差距比($ratio_{i/d}^{p}$)能够更有效的扭转现有演化趋势，并且随着时间的推移，同一人数差距比的有效性将会降低，而维持相同的有效性则需要进一步提升双方的人数差距比。

上述实验结果表明，越到传播后期，则需要愈发显著的人数差距比才能够改变已然形成的传播演化趋势。这主要是因为信谣者的“感染能力”强于免疫者，在人数差距不大的情况下信谣者本身占据一定优势，而且随着时间的推移，这种优势还将进一步扩大。因此，在虚假信息传播的后期阶段，若要扭转此种演化惯性，必须促使更大规模的群体达到免疫状态，同时引导更多的信谣群体转变原有的观点和态度，脱离虚假信息传播网络。

基于以上分析结果，本研究归纳总结出实现群体免疫的“干预”曲线（如图 14 所示）。

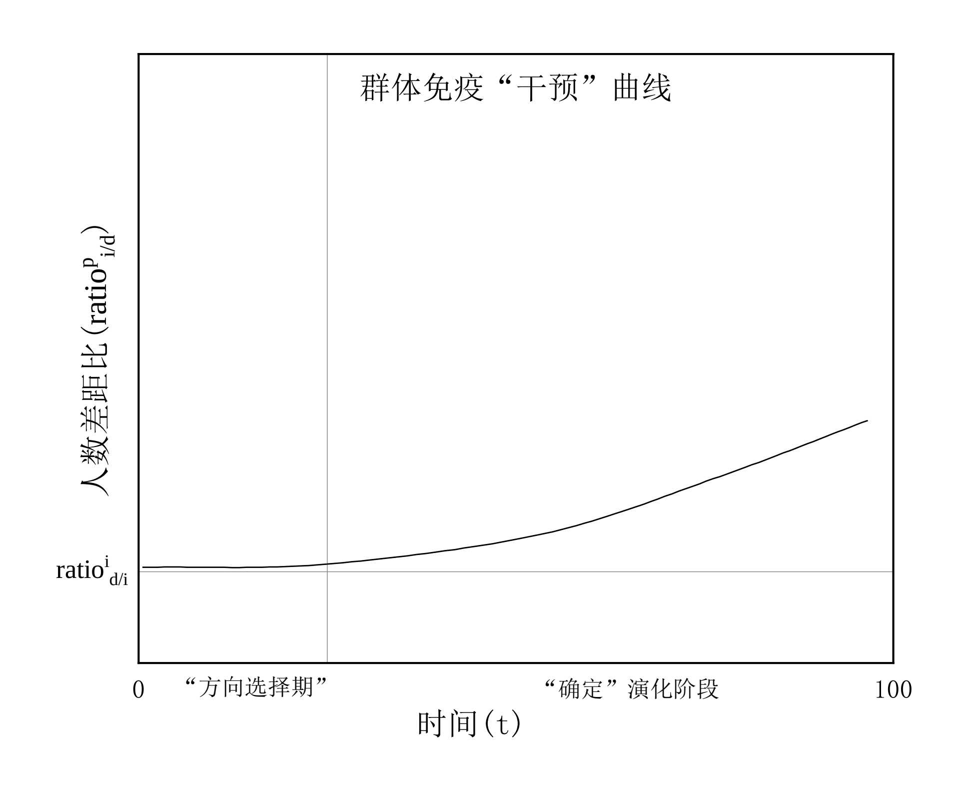


图 14 群体免疫干预曲线

其中，$ratio_{d/i}^{i}$表示的是免疫者与信谣者感染能力之比的倒数，也是双方人数差距比的基准线（最低阈值），若低于此数值，则无法实现虚假信息群体免疫。综合前文分析，本研究将虚假信息群体免疫干预过程划分为两个阶段：在“方向选择期”内，所需要的人数差距比变化并不明显，但必须始终维持在$ratio_{d/i}^{i}$上方，否则无法实现虚假信息群体免疫。当进入“确定”演化阶段以后，随着时间的推移，人数差距比呈逐渐上升的趋势，这说明干预时点越靠后，则需要的人数差距比就越大，而较大的人数差距比通常意味着更高的干预成本与干预难度。

以上分析对阈值区间的模糊性进行了探讨，但是并不能指导人们如何确定虚假信息群体免疫传播阈值区间的明确范围，具有一定局限

性。因此，本研究将继续探究确定虚假信息群体免疫传播阈值区间的有效方法。

4.5 群体免疫阈值区间的确定方法

基于上述仿真模拟分析，本研究提出了一种根据信谣者初始值估算群体免疫阈值区间的方法---信谣者估算曲线。

主要思路如下：根据前文“4.3 传播阈值稳定曲线”章节的分析可知，信谣者初始值$init_dece = 0.05$所对应的阈值区间为[0.24,0.28]，从中可以得到数组(0.05, [0.24,0.28])，其中，0.05 表示信谣者初始值($init_dece$)，而[0.24,0.28]表示与之对应的阈值区间。因此，本研究通过不断调整信谣者初始值，得到了与之一一对应的阈值区间数组列表（如表 2 所示）。此外，考虑到现实生活中，虚假信息的初始感染人数通常较为有限，因此本研究对信谣者初始值的估算最大至 0.15 。最后采用经验估算法对阈值区间进行估算，并根据数组列表绘制出信谣者估算曲线（如图 15 所示）。

表 2 阈值区间对照表

初始值 ($init_dece$)	阈值区间 (a,b)	区间下限/初始值 ($a/init_dece$)	区间上限/初始值 ($b/init_dece$)
0.01	（0.13,0.18）	13.00	18.00
0.02	（0.16,0.21）	8.00	10.50
0.03	（0.18,0.24）	6.00	8.00
0.04	（0.21,0.25）	5.50	6.50
0.05	（0.24,0.28）	4.80	5.60

0.06	（0.26,0.31）	4.33	5.71
0.07	（0.27,0.33）	3.86	4.17
0.08	（0.29,0.34）	3.63	4.25
0.09	（0.31,0.26）	3.44	4.00
0.10	（0.33,0.38）	3.30	3.80
0.11	（0.34,0.40）	3.09	3.64
0.12	（0.35,0.41）	2.92	3.42
0.13	（0.38,0.43）	2.92	3.31
0.14	（0.40,0.45）	2.86	3.21
0.15	（0.41,0.47）	2.73	3.13

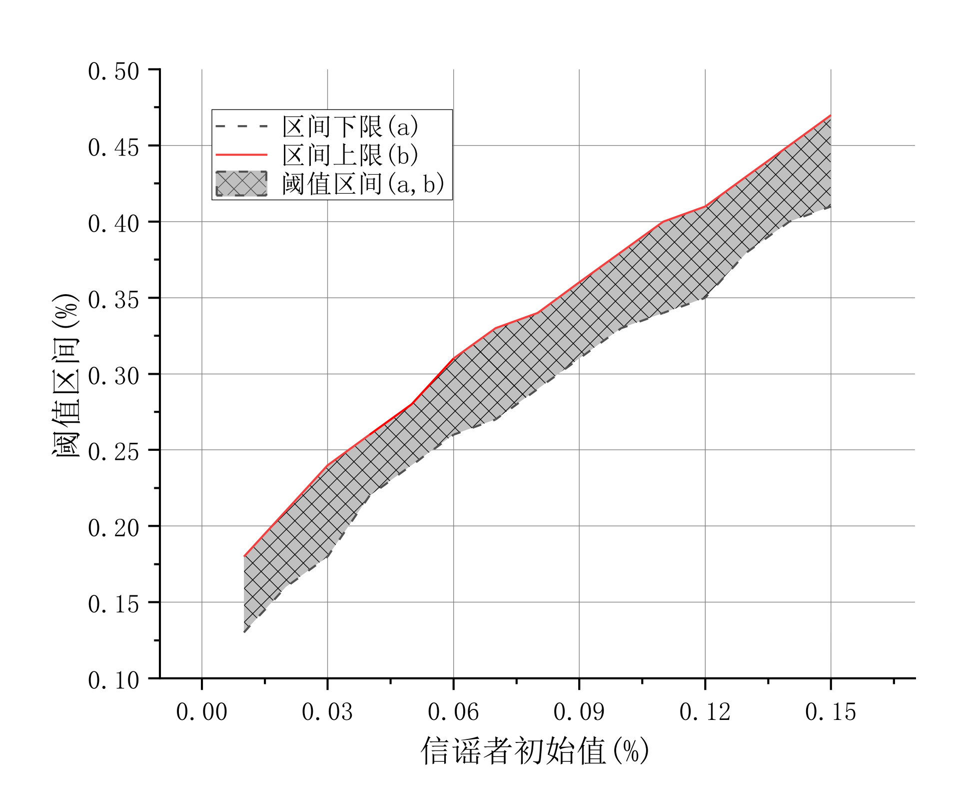


图 15 信谣者估算曲线（经验估算法）

图中实线为阈值区间的上限，虚线为阈值区间下限，中间阴影部分为阈值区间。从图中可以看到，无论是区间上限还是区间下限，大致均呈现出线性增加的趋势，因此，本研究采用线性趋势预测的方法对区间上限与区间下限的趋势线进行拟合（如图 16 所示），分别为 $y_{上} = 1.98x + 0.1781(R^2 = 0.9917)$ 和 $y_{下} = 1.93x + 0.1304(R^2 = 0.9865)$。

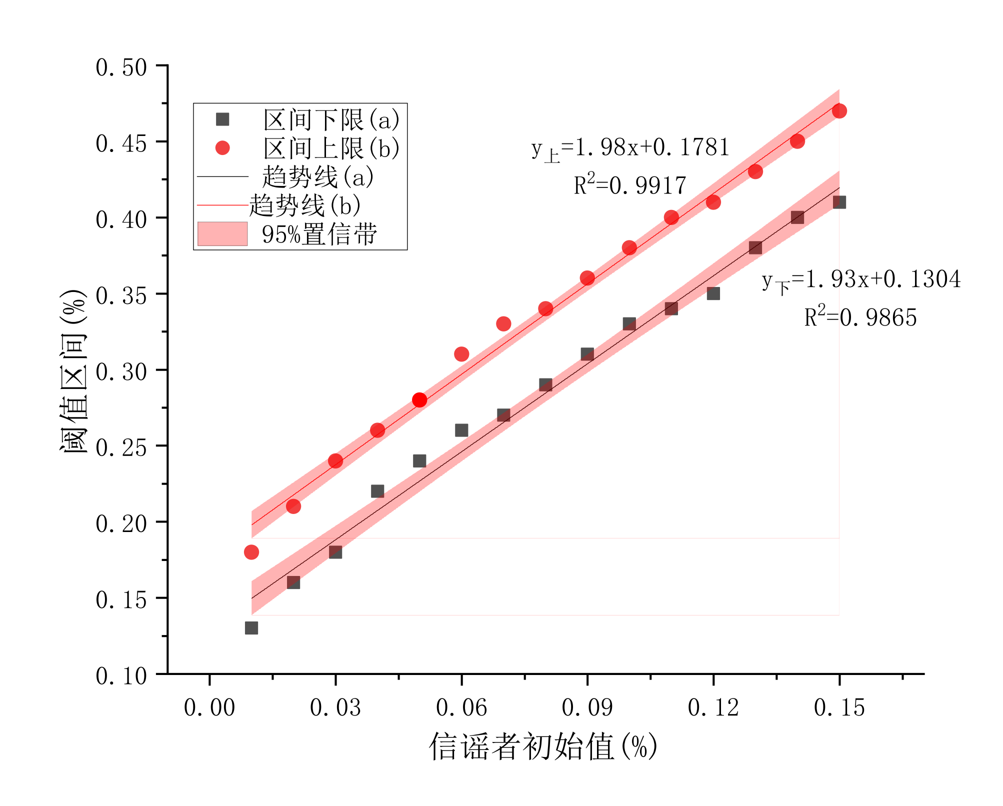


图 16 阈值区间拟合曲线（经验估算法）

此外，基于阈值区间上/下限与信谣者初始值之间的倍数关系，本研究尝试另一种方式对阈值区间上/下限进行估算----区间倍数法，即分别以该点对应的区间上限与区间下限除以初始值，然后绘制出信谣者估算曲线，如图 17 所示。

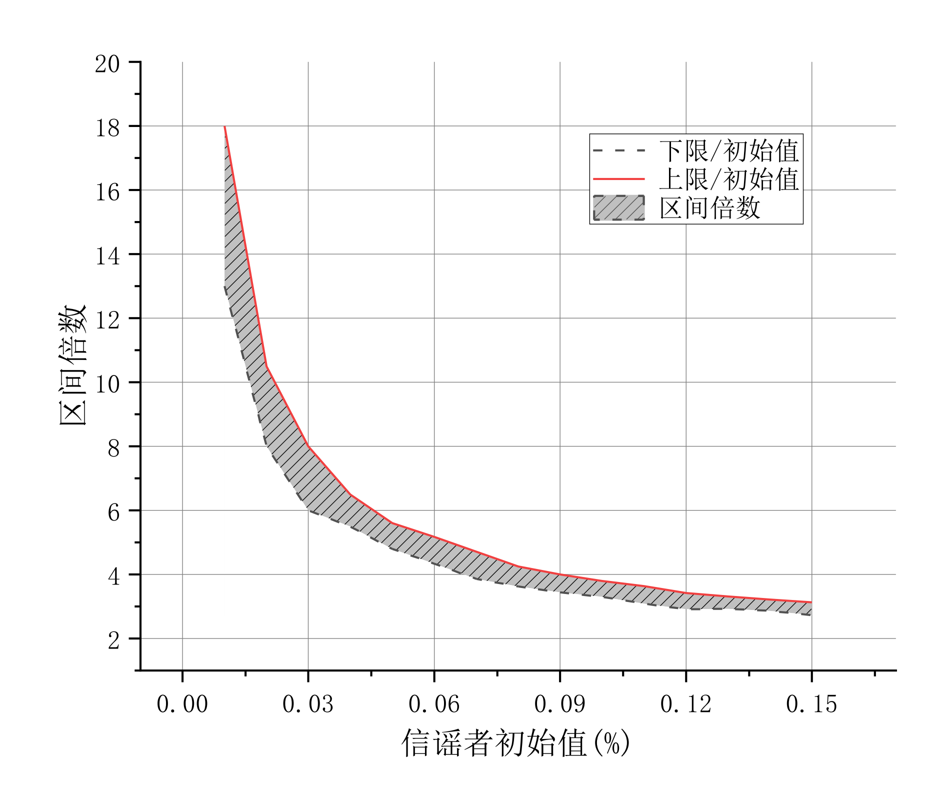


图 17 信谣者估算曲线（区间倍数法）

图中实线为阈值区间上限倍数曲线，而虚线为阈值区间下限倍数曲线，中间阴影部分为阈值区间倍数。通过观察可以发现，倍数曲线与信谣者初始值并非线性关系，因此，本研究采用非线性的方式对其进行拟合。最终经过多次尝试，发现采用乘幂趋势预测能够较好地拟合该曲线（如图 18 所示），从而得到阈值区间上/下限倍数线的趋势线分别为 $y_{上} = 16.477(100x)^{(-0.635)}(R^2 = 0.9927)$ 和 $y_{下} = 11.99(100x)^{(-0.562)}(R^2 = 0.9908)$。

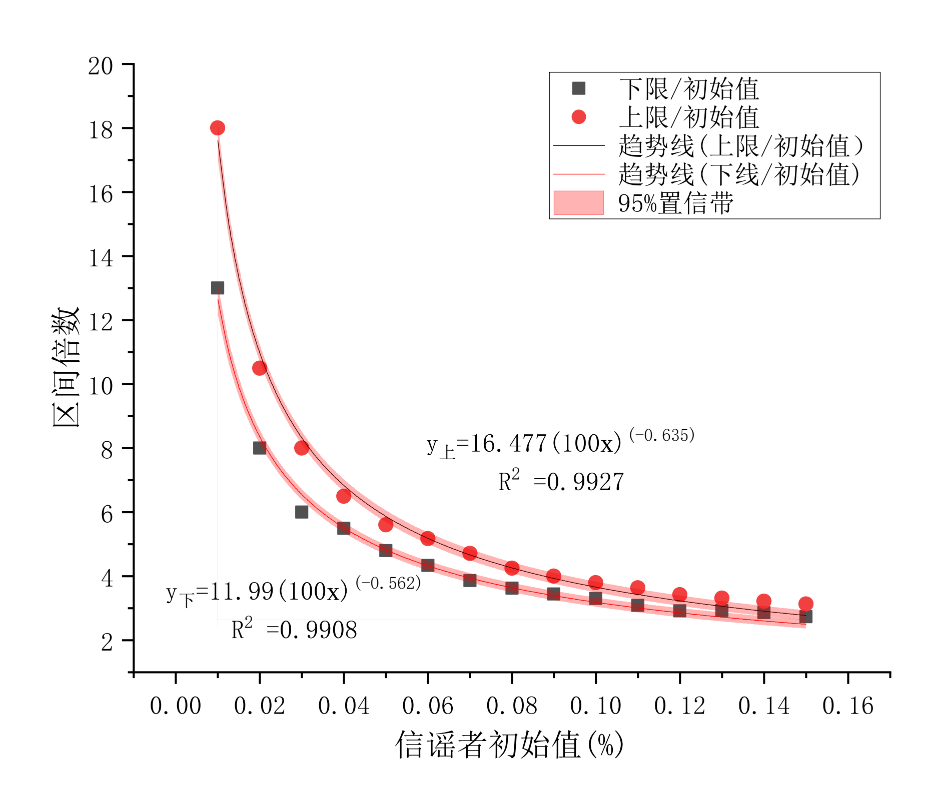


图 18 阈值区间倍数拟合曲线（区间倍数法）

现采用上述两种方式对信谣者初始值$init_dece=0.16$进行预测。首先，采用经验估算法进行估算，将$init_dece=0.16$分别代入$y_{上}=1.98x+0.1781$和$y_{下}=1.93x+0.1304$，得到$y_{上}=0.4949$，$y_{下}=0.4392$，因此阈值区间预测范围(0.44,0.50)。然后采用第二种方式——区间倍数法进行估算，将$init_dece=0.16$分别代入$y_{上}=16.477(100x)^{(-0.635)}$和$y_{下}=11.99(100x)^{(-0.562)}$，得到$y_{上}=2.8726$，$y_{下}=2.5241$，此时对应的阈值区间预测范围(0.40,0.46)。然后，将$init_dece=0.16$代入模型进行仿真实验（如图 19 所示），结果显示传播阈值区间为[0.43,0.49]，显然，从预测精度方面来说，经验估算法相较于区间倍数法更加精确。

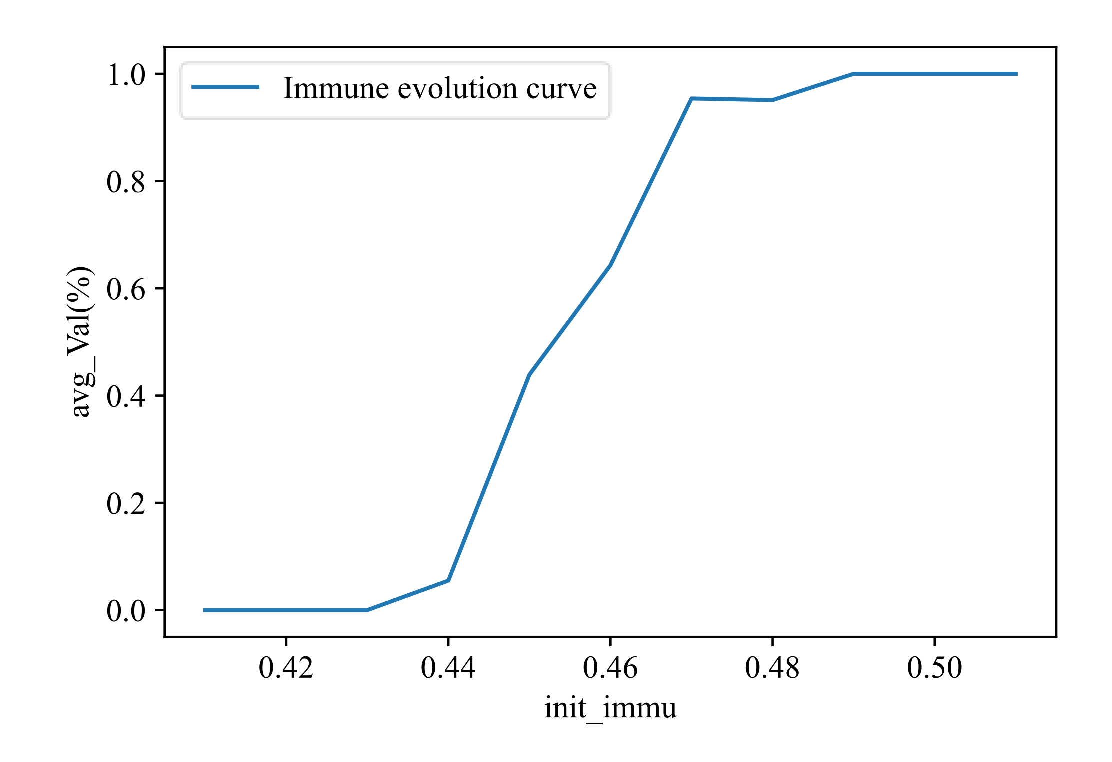


图 19　群体免疫阈值区间($init_dece = 0.16$)

以上事例表明，当信谣者的初始值确定之后，那么根据信谣者初始值与阈值区间的对应关系，就能够大致估算出群体免疫传播阈值的区间范围，进而采取更有针对性的应对举措遏制虚假信息的肆意传播。

5 结语

虚假信息的肆虐如同数字时代的瘟疫，其传播不仅侵蚀公众认知的纯净性，还严重干扰了社会共识的形成，对社会稳定构成潜在威胁。而事后补救的局限性日益凸显，迫使学术界深入研究预先防范策略，通过强化公众的信息辨识力，构筑起公众认知免疫屏障，从而抵御虚假信息侵袭与危害。本研究在预防接种理论的基础上，进一步构建了虚假信息群体免疫传播阈值测度模型。然后采用建模仿真的方式对群体免疫传播阈值展开探究。研究内容主要包括：首先采用试验法的方式寻找群体免疫传播阈值，然后对传播阈值的稳定性进行检验并绘制

了传播阈值稳定性曲线，并且通过层层假设的研究思路分析了阈值区间内数值点模糊性的形成原因，最后，提出了根据信谣者初始值估算传播阈值区间的方法并绘制了信谣者估算曲线，从而为群体免疫阈值区间的确定提供了有益参考。

研究表明，第一，虚假信息群体免疫传播阈值很可能并不是某个确定的数值点，而是一个具有过渡性质的阈值区间。区间内所有数值点均有可能实现群体免疫，并且越靠近区间上限，实现概率越大，越靠近区间下限，则实现概率越小；第二，“方向选择期”内，若免疫者与信谣者人数之比始终大于两者感染能力之比的倒数，那么免疫者人数将不断增多并实现群体免疫，反之，若某一时刻两者人数之比低于感染能力之比的倒数，则免疫者人数将减少，从而无法实现群体免疫；第三，在“确定”演化阶段，干预时点越是靠后，则扭转已然形成的演化趋势（例如将上升趋势扭转下降趋势，反之亦然）需要的免疫者与信谣者人数差距比就越大。第四，仿真实验表明，本研究提出的两种信谣者估算法都能够有效预测群体免疫传播阈值区间，但是在预测准确度方面，经验估算法相较于区间倍数法更更加精准。

本研究存在以下几点研究不足：首先是模型中部分参数主要依据个人经验设定并在模型调试过程不断进行优化，更多基于个人主观意愿；其次，模型中不同节点状态的划分标准主要依据个人经验设定。这主要是因为当前国内外相关研究缺乏相应的参考依据所致。事实上，本研究已经做过相关测试，发现调整节点划分标准主要对模型达到稳定状态的时间产生较大影响，并不会对研究结果及结论产生显著影响。

最后，模型最终演化结果与现实情况还存在一定出入（最终结果要么所有个体转变为免疫者要么所有个体转变为信谣者，这与实际情况不符）。这主要是因为模型并未考虑认知抗体的衰减以及其他影响因素，因此本研究将在后续研究中考虑更多影响虚假信息群体免疫的因素，从而修正和完善理论模型的构建。

作者贡献说明：

杨仁彪，理论构建、建模仿真及分析、初稿撰写及修改。

曹高辉，理论指导及论文修改。

李园园，文献综述撰写。

董焕晴，引言撰写以及修改。

参考文献

[1]张均胜,孙晓平,刘志辉. 自动迭代聚类数据集训练的虚假信息识别方法[J]. 情报学报, 2023, 42(01): 59-73.

[2]杨仁彪,尹春晓. 社交平台视域下考虑免疫逃逸效应的谣言传播与管控模型研究[J]. 情报科学, 2024, 42(01): 59-67.

[3]靖鲲鹏,岑怡. 社交网络舆情下的二元信息竞争SH2IR模型及仿真研究[J]. 情报杂志, 2022, 41(01): 117-124.

[4]王楠,宋晓宇,姜家慧,等. 基于博弈论视角的短视频用户信息传播模型及实证研究——以“钟薛高烧不化事件”为例[J]. 情报理论与实践, 2023, 46(09): 142-148+141.

[5]王佳亮,李海滨,李海燕. 基于复杂网络的新冠病毒群体免疫数值仿真[J]. 复杂系统与复杂性科学, 2023, 20(01): 27-33.
[6]PLOTKIN SA,ORENSTEIN WA,OFFIT PA. Community protection//Vaccines[M]. Usa: Elsevier, 2016: 2135-2159.
[7]Irina A. Iles,Arielle S. Gillman,Heather N. Platter, et al. Investigating the Potential of Inoculation Messages and Self-Affirmation in Reducing the Effects of Health Misinformation[J]. Science Communication, 2021, 43: 768-804.
[8]W. J. McGuire. Resistance to persuasion conferred by active and passive prior refutation of the same and alternative counterarguments.[J]. The Journal of Abnormal and Social Psychology, 1961, 63: 326-332.
[9]W. J. McGuire. Some Contemporary Approaches[J]. Advances in Experimental Social Psychology, 1964, 1: 191-229.
[10]Wang,Yuan. Psychological Inoculation Against Vaccine Misinformation: Why and When It Works[D]. University of Maryland, College Park, 2023.
[11]Cecilie S. Traberg,Jon Roozenbeek,Sander van der Linden. Psychological Inoculation against Misinformation: Current Evidence and Future Directions[J]. The Annals of the American Academy of Political and Social Science, 2022, 700(1): 136-151.
[12]Sander van der Linden,Anthony Leiserowitz,Seth Rosenthal, et al. Inoculating the Public against Misinformation about Climate Change[J]. Global Challenges, 2017, 1(2): 1600008.
[13]John A. Banas,Gregory Miller. Inducing Resistance to Conspiracy Theory Propaganda: Testing Inoculation and Metainoculation Strategies[J]. Human Communication Research, 2013, 39(2): 184-207.
[14]Jon Roozenbeek,Sander van der Linden. The fake news game: actively inoculating against the risk of misinformation[J]. Journal of Risk Research, 2018, 22(5): 570-580.
[15]A G Ramirez,C Despres,P Chalela, et al. Pilot study of peer modeling with psychological inoculation to promote coronavirus vaccination[J]. Health Education Research, 2022, 37(1): 1-6.
[16]李新月,练靖雯,宋士杰,等. 失真信息的预先干预研究：概念内涵、研究框架与未来展望[J]. 情报理论与实践, 2023, 46(09): 57-68.
[17]Arede Margarida,Bravo-araya Maria,Bouchard Émilie,等. Combating Vaccine Hesitancy: Teaching the Next Generation to Navigate Through the Post Truth Era[J]. Frontiers in Public Health, 2019, 6: 381.
[18]Stephan Lewandowsky,Sander van der Linden. Countering Misinformation and Fake News Through Inoculation and Prebunking[J]. European Review of Social Psychology, 2021, 32(2): 348-384.

[19]John Cook,Stephan Lewandowsky,Ullrich K. H. Ecker. Neutralizing misinformation through inoculation: Exposing misleading argumentation techniques reduces their influence[J]. Plos One, 2017, 12(5): e0175799.
[20]Jon Roozenbeek,Sander van der Linden,Beth Goldberg, et al. Psychological inoculation improves resilience against misinformation on social media[J]. Science Advances, 2022, 8(34): eabo6254.
[21]Jon Roozenbeek,Sander van der Linden. Fake news game confers psychological resistance against online misinformation[J]. Palgrave Communications, 2019, 5: 1-10.
[22]Roozenbeek Jon,Van der linden Sander,Nygren Thomas. Prebunking interventions based on the psychological theory of “inoculation” can reduce susceptibility to misinformation across cultures.[J]. Harvard Kennedy School Misinformation Review, 2020, 1(2): 1-23.
[23]Rakoen Maertens,Jon Roozenbeek,Melisa Basol, et al. Long-term effectiveness of inoculation against misinformation: Three longitudinal experiments.[J]. Journal of Experimental Psychology: Applied, 2021, 27(1): 1-16.
[24]Jon Roozenbeek,Cecilie S. Traberg,Sander van der Linden. Technique-based inoculation against real-world misinformation[J]. Royal Society Open Science, 2022, 9(5).
[25]Go viral[EB/OL]: 211719. https://www.goviralgame.com/books/go-viral.
[26]Harmony Square[EB/OL] [2024-12-10]. https://harmonysquare.game/en.
[27]Cranky Uncle[EB/OL] [2024-12-10]. https://crankyuncle.com/.
[28]李新月,宋士杰,韩文婷,等. 失真健康信息预先干预对个体...知与行为意愿影响的实证研究[J]. 信息资源管理学报, 2024, 14(01): 44-54.
[29]Sander van der Linden,Edward Maibach,John Cook, et al. Inoculating against misinformation[J]. Science, 2017, 358(6367): 1142-1142.
[30]Josh Compton,Michael Pfau. Spreading Inoculation: Inoculation, Resistance to Influence, and Word-of-Mouth Communication[J]. Communication Theory, 2009, 19(1): 9-28.
[31]Melisa Basol,Jon Roozenbeek,Manon Berriche, et al. Towards psychological herd immunity: Cross-cultural evidence for two prebunking interventions against COVID-19 misinformation[J]. Big Data & Society, 2021, 8(1): 20539517211013868.
[32]Jinjin Ma,Yidi Chen,Huanya Zhu, et al. Fighting COVID-19 Misinformation through an Online Game Based on the Inoculation Theory: Analyzing the Mediating Effects of Perceived Threat and Persuasion Knowledge[J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2023, 20(2): 980.
[33]Ariana Modirrousta-Galian,Philip A. Higham. Gamified inoculation interventions do not improve discrimination between true and fake news: Reanalyzing existing research with receiver operating characteristic analysis.[J]. Journal of Experimental Psychology: General, 2023, 152(9): 2411-2437.

[34]Toby D. Pilditch,Jon Roozenbeek,Jens Koed Madsen, et al. Psychological inoculation can reduce susceptibility to misinformation in large rational agent networks[J]. Royal Society Open Science, 2022, 9(8): 211953.

[35]曹雪涛. 医学免疫学(第九版)[M]. 北京: 人民卫生出版社, 2019: 29.

[36]王世雄,朱明旻,骆彦余. 信息疫情中真假信息竞争性传播研究[J]. 现代情报, 2023, 43(09): 124-136.

[37]P. Fine,K. Eames,D. L. Heymann. "Herd Immunity": A Rough Guide[J]. Clinical Infectious Diseases, 2011, 52(7): 911-916.

[38]吴丹,郑徽,李艺星,等. 群体免疫及其对传染病防控的意义[J]. 中国疫苗和免疫, 2020, 26(04): 479-483.